

# 面向空间引力波探测的毫赫兹频段 低强度噪声单频激光器\*

王在渊<sup>1)2)3)</sup> 王浩浩<sup>1)2)</sup> 李宇航<sup>1)2)</sup>† 柳强<sup>1)2)</sup>‡

1) (清华大学精密仪器系, 北京 100084)

2) (清华大学, 光子测控技术教育部重点实验室, 北京 100084)

3) (陆军工程大学军械士官学校, 武汉 430075)

(2022 年 11 月 7 日收到; 2022 年 12 月 7 日收到修改稿)

低噪声单频激光器是空间引力波探测系统中的核心器件, 其噪声性能直接影响空间引力波探测器的灵敏度. 本文报道了一种面向空间引力波探测的低噪声单频激光器, 利用全保偏光纤结构的功率放大器对低功率、窄线宽、低噪声的非平面环形振荡器输出激光进行放大. 为降低激光的强度噪声, 比较了不同泵浦源的输出特性, 为光纤放大器选用波长锁定的泵浦源, 降低泵浦光波长随温度漂移对输出功率的影响, 利用光电负反馈控制技术抑制输出激光的强度噪声, 结合主动精确控温技术抑制关键器件的热噪声, 实现了毫赫兹频段强度噪声的抑制. 利用自主搭建的 4 通道相对强度噪声测量系统, 测得反馈控制后的激光器相对强度噪声在 1 mHz—1 Hz 频段内低于 -60 dBc/Hz, 在 1 mHz 和 1 Hz 处分别为 -63.4 dBc/Hz 和 -105.8 dBc/Hz. 研究表明, 通过放大器泵浦电流的反馈控制和关键器件的温度控制可以有效地抑制激光器在毫赫兹频段的强度噪声, 为进一步提高低频段强度噪声性能奠定基础.

**关键词:** 单频激光器, 毫赫兹频段, 相对强度噪声, 光电负反馈

**PACS:** 42.55.Wd, 42.60.By, 42.62.-b, 95.55.Ym

**DOI:** 10.7498/aps.72.20222127

## 1 引言

低噪声单频激光器是激光干涉仪空间引力波探测系统中的核心器件, 其噪声性能直接影响引力波探测器的灵敏度<sup>[1]</sup>. 由于空间引力波探测系统的探测目标是 0.1 mHz—1 Hz 频段内的引力波, 所以这对激光器在毫赫兹频段的噪声性能提出严苛的要求<sup>[2]</sup>. 例如, 在发展最久、成熟度最高的激光干涉仪空间天线 (laser interferometer space antenna, LISA) 项目中, 要求激光器在 2 W 输出时的相对强度噪声 (relative intensity noise, RIN) 不大于  $2 \times$

$10^{-4} / \text{Hz}^{1/2} @ 0.1 \text{ mHz} - 1 \text{ Hz}$ <sup>[3]</sup>. 主控振荡器-功率放大器 (master oscillator power amplifier, MOPA) 结合低噪声种子源和高性能放大器的优点, 具有光学性能优越、易于实现等特点<sup>[4,5]</sup>, 因此可用于空间引力波探测系统. 一般而言, 高性能种子源可以在大于弛豫振荡峰的频率范围获得低强度噪声, 但是由于泵浦噪声和环境因素等影响<sup>[6,7]</sup>, 在低于弛豫振荡峰的频段, 尤其是在 mHz—Hz 频段内, 其噪声性能迅速劣化, 难以满足引力波探测需求. 如何有效地抑制毫赫兹频段的强度噪声是研制面向空间引力波探测激光器的关键问题之一.

以 LISA 项目为牵引, 国外研究人员对低噪声单

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2020YFC2200403) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [liyuhang@tsinghua.edu.cn](mailto:liyuhang@tsinghua.edu.cn)

‡ 通信作者. E-mail: [qiangliu@tsinghua.edu.cn](mailto:qiangliu@tsinghua.edu.cn)

频激光器开展了诸多研究并已取得了重要的进展. 2005 年, 德国汉诺威激光中心研制了 Nd:YAG 非平面环形振荡器 (non-planar ring oscillator, NPRO) 注入到光纤放大器的 MOPA 激光器, 输出功率为 1 W, RIN 为  $3 \times 10^{-3} / \text{Hz}^{1/2} @ 1 \text{ mHz} - 1 \text{ Hz}$  [8]. 2014 年, 欧洲航天局 (European space agency, ESA) 为下一代引力任务 (next generation gravity mission, NGGM) 研制了高稳定性激光器, 种子激光器采用经过空间验证的 NPRO, 注入功率为 25 mW, 放大器输出功率  $> 500 \text{ mW}$ . 在该激光器中, 采用光电反馈控制技术稳定激光功率, 对泵浦激光二极管 (laser diode, LD) 和光纤器件进行温度控制, 获得了满足 NGGM 要求的低噪声激光 [9]. 2018 年, Dahl 等 [10] 为 LISA 研制了平面波导外腔激光器 (planar-waveguide external cavity laser, PW-ECL) 注入的 MOPA 激光器, 种子激光经半导体光放大器 (semiconductor optical amplifier, SOA) 预放大后, 注入光纤放大器的激光功率约 300 mW, 放大后得到 2.1 W 的输出功率, 但是低于 3 mHz 频段内的 RIN 不满足 LISA 的要求. 2019 年, Numata 等 [1] 研究了微型 NPRO (m-NPRO) 的性能, 结果表明, m-NPRO 比 NPRO 更具优势, 采用 m-NPRO 注入光纤放大器的 MOPA 激光器是 LISA 中低噪声激光器的最优方案. 近年来, 国内也部署了空间引力波探测任务. 2015 年, 中山大学启动了“天琴计划” [11,12]; 2016 年, 中国科学院启动了“太极计划” [13,14], 其探测频段覆盖 LISA 的 1 mHz—1 Hz. 空间引力波探测的相关研究迅速成为国内热点内容, 但是, 国内关于毫赫兹频段低噪声单频激光器的研究和报道较少.

本文采用低噪声、窄线宽 NPRO 激光器作为主控振荡器, 结合低噪声全保偏光纤放大技术, 利用光电负反馈回路控制放大器的泵浦电流, 从而对输

出激光的强度噪声进行抑制, 获得了毫赫兹频段的低噪声激光输出, 在输出激光功率为 2.13 W 时测得 1 mHz—1 Hz 频段内的 RIN 均低于  $-60 \text{ dBc/Hz}$ , 在 1 mHz 和 1 Hz 处的 RIN 分别为  $-63.4 \text{ dBc/Hz}$  和  $-105.8 \text{ dBc/Hz}$ .

## 2 激光器设计与研制

图 1 为低噪声单频激光器的示意图, 激光器采用 MOPA 结构, 包括主控振荡器、全保偏光纤放大器和反馈控制回路三部分. 主控振荡器采用窄线宽单频 NPRO 激光器, 输出功率最大达 500 mW, 线宽约为 1 kHz; 全保偏光纤放大器由泵浦 LD,  $(2+1) \times 1$  保偏光纤合束器、2.1 m 长的双包层掺镱增益光纤 (PLMA-YDF-10/125-VIII, Nufern)、包层功率剥除器 (cladding power stripper, CPS) 以及光纤分束器等组成; 反馈控制回路由光纤衰减器、光电探测器以及比例-积分-微分 (proportional-integral-derivative, PID) 控制器组成. 主控振荡器输出的信号光经保偏光纤隔离器后与泵浦光合束, 共同注入到保偏增益光纤中进行功率放大, 输出激光经过 CPS 剥除包层中的残余泵浦光功率, 保证只有 1064 nm 的信号光输出. 保偏光纤分束器 (分光比为 1/99) 1% 端的光束进入反馈控制回路, 经光电探测器转换为电信号, 与 PID 控制器的内部基准电压信号进行比较, 得到误差信号, 利用该误差信号实时调整泵浦 LD 的驱动电流, 通过调整泵浦功率实时改变放大器的输出激光功率, 实现输出激光强度噪声的抑制.

对于 MOPA 结构的激光器, 光纤放大器中泵浦 LD 的功率波动是造成输出激光 RIN 在低频段劣化的主要因素之一, 因而降低泵浦 LD 的功率波动是抑制激光 RIN 的重要途径 [15,16]. 由于掺镱增

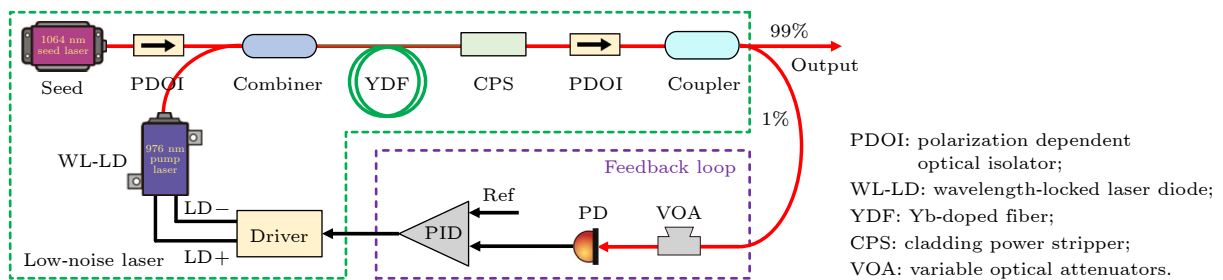


图 1 低噪声单频激光器的结构示意图

Fig. 1. Schematic of the low-noise single-frequency laser system.

益光纤在 976 nm 附近的吸收系数对泵浦波长敏感, 因此, 激光器的强度噪声与泵浦 LD 的波长稳定性有关. 通过实验比较了不同温度下的两种泵浦 LD 的光谱, 结果如图 2 所示, 图 2(a) 为不锁波长泵浦 LD 的光谱, 随着工作温度的升高, 其波长向长波方向漂移; 图 2(b) 为锁波长泵浦 LD 的光谱, 随温度变化漂移较小, 波长稳定性高. 因此, 为了降低泵浦源的噪声, 选用波长锁定的泵浦 LD.

### 3 激光器测试与讨论

#### 3.1 相对强度噪声测试方法

激光器输出功率的波动情况在时域上用功率稳定性描述, 在频域上用强度噪声描述. 在分析激光器的强度噪声性能时, 通常采用 RIN 来衡量, 定义为

$$\text{RIN} = S_p(f)/\bar{P}^2, \quad (1)$$

式中,  $S_p(f)$  为输出激光功率波动的功率谱密度;  $\bar{P}$  为激光器输出的平均功率 [17].

在评估 RIN 时, 通常采用低噪声光电探测器和频谱分析仪直接测量 [18]. 把输出激光衰减到合适的功率水平, 经光电探测器转化为电信号, 通过频谱分析仪测量电信号的功率谱密度. 受限于现有测量仪器的频率分辨率、测量范围和计算能力, 在测量低频段的 RIN 时, 测量时间长, 数据量大, 且需要分频段测量后进行拼接, 操作繁琐. 因此, 对于毫赫兹及更低频段的 RIN 评估, 一般采用数字万用表 (digital multimeter, DMM) 或高精度数字采集卡长时间记录电信号, 通过计算获得所测电信号的功率谱密度 [19]. 为此, 设计和研制了高精度的 4 通道 RIN 测量系统, 采用 24 bit 的数据采集卡, 采样率最高为 204.8 kS/s, 测量频率范围为 2  $\mu\text{Hz}$ —102.4 kHz, 满足毫赫兹频段 RIN 的测量需求.

图 3 所示为激光 RIN 测量示意图, 分为内环 (in-loop) 和外环 (out-of-loop) 两路, 其中, 内环电信号也作为激光器强度噪声抑制的输入信号. 在激光器的内环控制回路中, 光信号和电信号的转化较为复杂, 经过“信号光→电信号→泵浦光→信号光”

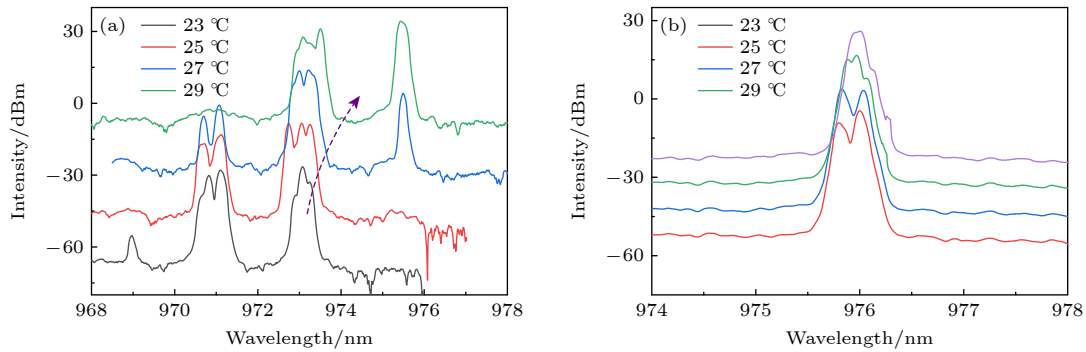


图 2 不同温度下泵浦 LD 的光谱 (a) 不锁波长 LD 的光谱; (b) 锁波长 LD 的光谱

Fig. 2. Optical spectra of 976 nm pump laser diodes at different temperature: (a) Wavelength-unlocked; (b) wavelength-locked.

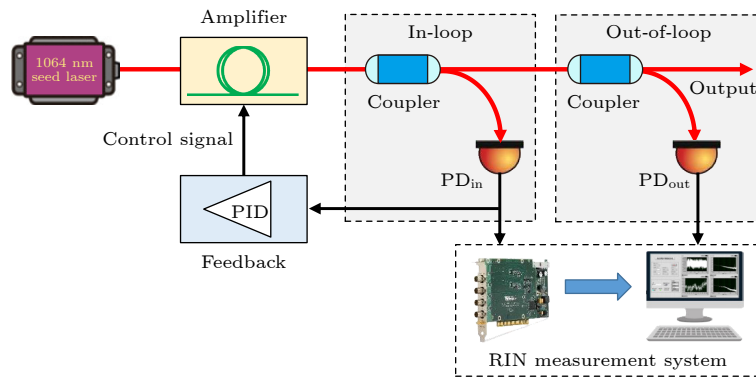


图 3 RIN 测量示意图

Fig. 3. Experimental setup of RIN measurement.

后,各环节中的光学器件和电学器件均会引入噪声,相当于在内环链路中引入多个技术噪声源,其噪声经过光纤放大器后叠加到外环的光信号上,因此,采用光电负反馈控制的激光器的内、外环强度噪声存在较大的差别,实测的外环噪声性能要比内环差<sup>[20]</sup>.

### 3.2 RIN 测试结果

测试采用铟镓砷光电探测器 (DET01 CFC/M, Thorlabs) 和动态信号采集卡 (PXI4462, NI) 进行长时间的记录,并利用 LPSD(logarithmic frequency axis power spectral density) 算法得到对数坐标上平滑的功率谱密度<sup>[21]</sup>. 在室温条件 ( $(23 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ ) 下,当激光器输出功率为 2.13 W 时,分别测得种子激光、放大器自由运转和反馈抑制时的信号,结果如图 4 所示.

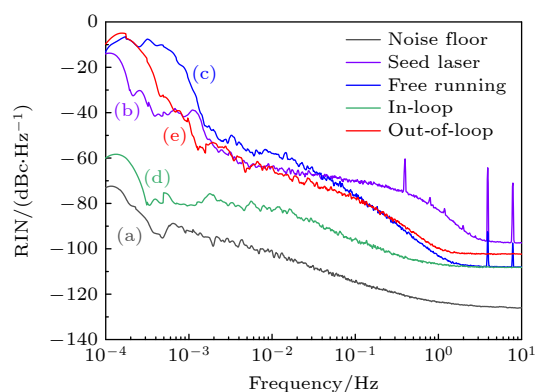


图 4 0.1 mHz—10 Hz 频段内的 RIN 测量结果

Fig. 4. Measured RIN in the frequency of 0.1 mHz–10 Hz.

图 4 中曲线 (a) 为 RIN 测量系统的噪底,在 1 mHz—1 Hz 内,噪底低于  $-90$  dBc/Hz; 曲线 (b) 和曲线 (c) 分别为种子激光和放大器自由运转时的 RIN. 在低于 50 mHz 的频段内,输出激光的 RIN 开始劣化,10 mHz 处劣化达 10 dB,在低于 1 mHz 频段劣化更为严重,最大可达 30 dB 以上. 当反馈回路工作时,测得内环和外环的 RIN 如曲线 (d) 和曲线 (e) 所示,在低于 0.1 Hz 频段,内、外环的 RIN 并不相同,且内环明显优于外环,随着频率的降低,内外环的差别增大. 与自由运转时的 RIN 相比,外环的 RIN 得到了有效的抑制,在 10 mHz 处 RIN 抑制了约 10 dB,在 1 mHz 处 RIN 抑制了约 20 dB. 但是,在低于 4 mHz 频段,外环 RIN 依然大于  $-60$  dBc/Hz.

### 3.3 温度对相对强度噪声的影响

利用红外热成像仪 (T540, FLIR) 对光纤放大器内部进行拍照测温,在放大器工作 2 h 后观察内部热分布情况,结果如图 5 所示. 其中,测温点①为泵浦 LD,测得 LD 的表面温度 ( $26.2^\circ\text{C}$ ) 高于设定的 TEC 控制温度 ( $25^\circ\text{C}$ ). 测温点②为输出光纤分束器,其温度随着输出激光功率的增大而升高,在输出功率为 2.13 W 时,测得温度为  $27.5^\circ\text{C}$ . 测温点③为光纤放大器内部壳体,温度为  $23^\circ\text{C}$ ,与水冷板的水温设置值相同.

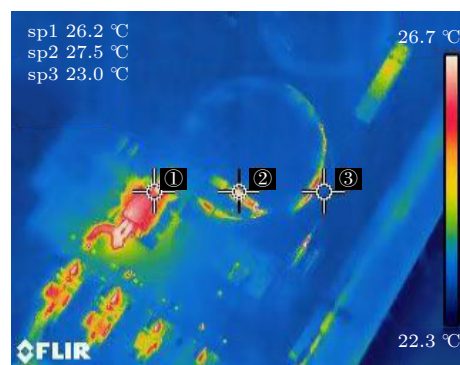


图 5 放大器内部的红外热像图

Fig. 5. Infrared thermal image inside the fiber amplifier.

由于泵浦 LD 和输出光纤分束器的温度与放大器内部的温度差别较大,存在热交换,影响泵浦 LD 的泵浦功率和光纤分束器分光比的稳定性,从而增大输出激光的 RIN. 为降低温度对低频段 RIN 的影响,对泵浦 LD 和光纤分束器设计了包裹更为严密、散热性能更好的紫铜夹具,并对泵浦 LD 和光纤分束器进行主动精确控温. 在不同的工作温度下,分别测量外环的 RIN,得到图 6 所示的

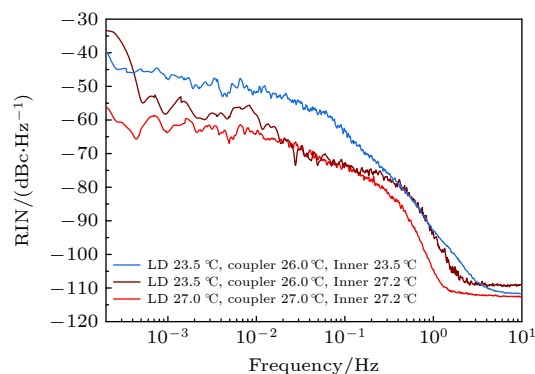


图 6 不同温度下的外环 RIN 测量结果

Fig. 6. RIN measurement results of the out-of-loop at the different temperatures.



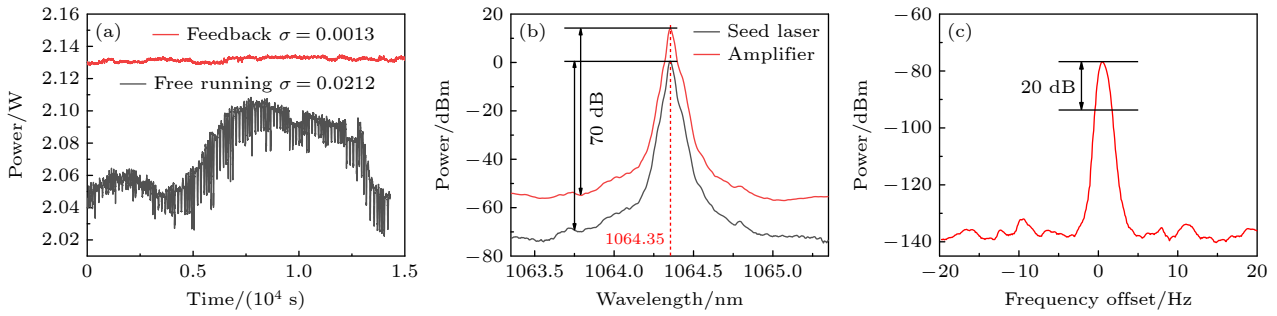


图 7 2.13 W 输出时的功率稳定性 (a)、放大前后的光谱 (b) 和放大器的附加线宽 (c)

Fig. 7. Power stability (a), optical spectra (b) and additional linewidth (c) at 2.13 W output, respectively.

RIN 曲线. 从图 6 可知, 外环 RIN 受泵浦 LD、光纤分束器和放大器内部温度的影响较大, 尤其是低频段的 RIN 更为严重. 因此, 精确控制关键器件温度和环境温度对进一步提高毫赫兹频段的强度噪声性能很关键. 通过实验测试和分析, 设置泵浦 LD 和光纤分束器的温度为 27 °C, 与长时间工作后放大器的内部温度十分接近, 在这种情况下, 测得外环 RIN 最低, 1 Hz 处达  $-105.8 \text{ dBc/Hz}$  ( $5 \times 10^{-6} / \text{Hz}^{1/2}$ ), 1 mHz 处达  $-63.4 \text{ dBc/Hz}$  ( $6.8 \times 10^{-4} / \text{Hz}^{1/2}$ ).

### 3.4 功率稳定性、光谱和附加线宽

图 7(a) 是光纤放大器在输出功率为 2.13 W 时的功率稳定性. 当泵浦 LD 的注入电流为 4.2 A, 泵浦光功率为 6 W 时, 光纤放大器的输出功率为 2.13 W, 输出激光在 4 h 内的功率波动  $< 0.13\%$ . 图 7(b) 是种子激光和保偏光纤放大器输出激光的光谱图, 可以看出, 种子激光和放大器输出激光的中心波长都是 1064.35 nm, 信噪比均大于 70 dB. 图 7(c) 是利用马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder Interferometer, MZI) 测量的 2.13 W 输出功率下光纤放大器的附加线宽 [22,23]. 由图 7(c) 可知, 光纤放大器产生的附加线宽在 20 dB 处约为 1.9 Hz, 因此光纤放大器对种子激光线宽的展宽非常小, 可忽略不计.

## 4 结 论

本文报道了一种面向空间引力波探测用的低强度噪声单频激光器. 激光器采用 MOPA 结构, 其中主控振荡器采用低噪声、窄线宽的 NPRO 激光器, 放大器采用抗外界扰动能力强的全保偏光纤放大器. 通过光电负反馈和对泵浦 LD 与输出光纤分束器的温度控制, 实现了低强度噪声的稳定运

转. 通过自主搭建的基于高分辨率数据采集卡的强度噪声测量系统, 测得激光器 RIN 在 1 mHz—1 Hz 频段内低于  $-60 \text{ dBc/Hz}$ , 在 1 mHz 和 1 Hz 处分别为  $-63.4 \text{ dBc/Hz}$  和  $-105.8 \text{ dBc/Hz}$ . 研究结果表明, 通过光电负反馈控制光纤放大器的泵浦电流可以有效地抑制输出激光的 RIN. 另外, 在低于毫赫兹频段, 温度漂移是 RIN 劣化的主要原因. 因此, 对泵浦 LD、光纤分束器等关键器件和环境温度进行更为精确的温度控制, 可以进一步提高激光器低频段的 RIN 性能.

## 参考文献

- [1] Numata K, Yu A, Jiao H, Merritt S, Micalizzi F, Fahey M, Camp J, Krainak M 2019 *Proceedings of SPIE: Solid State Lasers XXIII: Technology and Devices* **10896** 108961H
- [2] Luo Z R, Bai S, Bian X, Chen G R, Dong P, Dong Y H, Gao W, Gong X F, He J W, Li H Y, Li X Q, Li Y Q, Liu H S, Shao M X, Song T X, Sun B S, Tang W L, Xu P, Xu S N, Yang R, Jin G 2013 *Adv. Mech.* **43** 415 (in Chinese) [罗子人, 白珊, 边星, 陈葛瑞, 董鹏, 董玉辉, 高伟, 龚雪飞, 贺建武, 李洪银, 李向前, 李玉琼, 刘河山, 邵明学, 宋同消, 孙保三, 唐文林, 徐鹏, 徐生年, 杨然, 靳刚 2013 *力学进展* **43** 415]
- [3] Peterseim M, Brozek O S, Danzmann K, Freitag I, Rottengatter P, Tünnermann A, Welling H 1998 *AIP Conf. Proc.* **456** 148
- [4] O'Brien S, Welch D, Parke R, Mehuys D, Dzurko K, Lang R, Waarts R, Scifres D 1993 *IEEE J. Quantum Electron.* **29** 2052
- [5] Yang C S, Xu S H, Chen D, Zhang Y F, Zhao Q L, Li C, Zhou K J, Feng Z M, Gan J L, Yang Z M 2016 *J. Opt.* **18** 055801
- [6] Kane T 1990 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **2** 244
- [7] Li C 2015 *Ph. D. Dissertation* (Guangzhou: South China University of Technology) (in Chinese) [李灿 2015 博士学位论文 (广州: 华南理工大学)]
- [8] Tröbs M 2005 *Ph. D. Dissertation* (Hannover: Leibniz University Hannover)
- [9] Nicklaus K, Herding M, Wang X, Beller N, Fitzau O, Giesberts M, Herper M, Barwood G P, Williams R A, Gill P, Koegel H, Webster A, Gohlke M 2014 *Proceedings of the International Conference on Space Optics* **10563** 105632T

- [10] Dahl K, Cebeci P, Fitzau O, Giesberts M, Greve C, Krutzik M, Peters A, Pyka S, Sanjuan J, Schiemangk M, Schuldt T, Voss K, Wicht A 2018 *Proc. SPIE* **11180** 111800C
- [11] Milyukov V 2020 *Astron. Rep.* **64** 1067
- [12] Gong Y G, Jun Luo, Wang B 2021 *Nat. Astron.* **5** 881
- [13] Luo Z R, Guo Z K, Jin G, Wu Y L, Hu W R 2020 *Results Phys.* **16** 102918
- [14] Luo Z R, Wang Y, Wu Y L, Hu W R, Jin G 2021 *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2021** 05A108
- [15] Foster S B, Tikhomirov A E. 2010 *IEEE J. Quantum Electron.* **46** 734
- [16] Guiraud G, Traynor N, Santarelli G 2016 *Opt. Lett.* **41** 4040
- [17] Yang Z M, Xu S H 2017 *Single-frequency Fiber Laser* (Beijing: Science Press) p59 (in Chinese) [杨中民, 徐善辉 2017 单频光纤激光器(北京: 科学出版社) 第59页]
- [18] Hui R Q, O' Sullivan M 2009 *Fiber Optic Test & Measurement* (California: Elsevier Academic Press) pp263–264
- [19] Li F, Wang J W, Gao Z C, Li J B, An B N, Li R X, Bai Y, Yin W B, Tian L, Zheng Y H 2022 *Acta Phys. Sin.* **17** 209501 (in Chinese) [李番, 王嘉伟, 高子超, 李健博, 安炳南, 李瑞鑫, 白禹, 尹王保, 田龙, 郑耀辉 2022 物理学报 **17** 209501]
- [20] Willke B 2010 *Laser Photonics Rev.* **4** 780
- [21] Tröbs M, Heinzel G 2006 *Measurement* **39** 120
- [22] Möller L 1998 *IEEE J. Quantum Electron.* **34** 1554
- [23] Xue M Y, Gao C X, Niu L Q, Zhu A L, Sun C D 2020 *Appl. Opt.* **59** 2610

# Millihertz band low-intensity-noise single-frequency laser for space gravitational wave detection\*

Wang Zai-Yuan<sup>1)2)3)</sup> Wang Jie-Hao<sup>1)2)</sup> Li Yu-Hang<sup>1)2)†</sup> Liu Qiang<sup>1)2)‡</sup>

1) (*Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

2) (*Key Laboratory of Photonic Control Technology, Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

3) (*Ordnance Sergeant College of Army Engineering University, Wuhan 430075, China*)

( Received 7 November 2022; revised manuscript received 7 December 2022 )

## Abstract

A low-noise single-frequency laser is a key component of the space-based gravitational wave detector, and the intensity noise of the laser directly affects the sensitivity of the space-based GW detector. In this work, we report a low-noise single-frequency laser designed for space-based gravitational wave detector. The laser is based on a master oscillator power amplifier (MOPA), which is designed to possess a low-power, narrow-linewidth seed laser acting as master oscillator (MO) and an all polarization-maintaining fiber amplifier acting as power amplifier (PA). The amplifier that uses a robust mechanical design consists of an Yb-doped double-clad fiber forward pumped by wavelength-locked 976 nm pump laser diode (LD) to achieve 2.13 W of output power and 70 dB of signal-noise ratio (SNR). To suppress the relative intensity noise (RIN) in a millihertz regime (1 mHz–1 Hz), we characterize the power stabilization of a pump diode laser based on a proportional-integral-derivative (PID) feedback control loop where an in-loop photodetector is used. The power fluctuation can be converted into the fluctuation of the current signal by the photodiode, the current signal is converted into the voltage signal and amplified by a transimpedance circuit. Then, the voltage signal is compared with the voltage reference signal, and the error signal is achieved to adjust real-timely the drive current of the pump laser diode. This is a good way to significantly suppress the RIN of a laser at low frequencies, but the measured RIN below 4 mHz is still higher than  $-60$  dBc/Hz. In order to further suppress the RIN to lower than 4 mHz, an active precise temperature control technology is used to suppress the thermal noise from pump LD and fiber coupler. To assess the RIN millihertz regime, we design an RIN measurement system consisting of a high-precision signal acquisition card (24 bit) and a computer program based on LabVIEW. The measurement range of the system is  $2\text{ }\mu\text{Hz}$ – $102.4\text{ kHz}$  and the frequency resolution up to  $2\text{ }\mu\text{Hz}$ , much better than the counterparts of commercial instruments. By stabilizing the fiber amplifier pump LD current and the temperature of pump LD and the temperature of fiber coupler, the out-of-loop RINs are measured to be  $-63.4\text{ dBc/Hz@1 mHz}$  and  $-105.8\text{ dBc/Hz@1 Hz}$ , and in a millihertz regime of 1 mHz–1 Hz, the RIN is below  $-60\text{ dBc/Hz}$ . The results show that the feedback control of the fiber amplifier pump LD current and the temperature control of the key devices can effectively suppress the RIN in the millihertz frequency band, which lays a foundation for further improving the intensity noise performance in the low frequency band.

**Keywords:** single-frequency laser, millihertz band, relative intensity noise, optoelectronic negative feedback

**PACS:** 42.55.Wd, 42.60.By, 42.62.-b, 95.55.Ym

**DOI:** 10.7498/aps.72.20222127

\* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2020YFC2200403).

† Corresponding author. E-mail: [liyuhang@tsinghua.edu.cn](mailto:liyuhang@tsinghua.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [qiangliu@tsinghua.edu.cn](mailto:qiangliu@tsinghua.edu.cn)

## 面向空间引力波探测的毫赫兹频段低强度噪声单频激光器

王在渊 王洁浩 李宇航 柳强

## Millihertz band low-intensity-noise single-frequency laser for space gravitational wave detection

Wang Zai-Yuan Wang Jie-Hao Li Yu-Hang Liu Qiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 054205 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20222127

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222127>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 1064 nm固体激光器和光纤激光器在制备压缩真空态光场实验中的对比研究

Comparative study of squeezed vacuum states prepared by using 1064-nm solid-state and fiber-laser as pump source

物理学报. 2019, 68(12): 124201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182304>

#### 增益开关线偏振单频脉冲光纤激光器

Gain switched linearly polarized single-frequency pulsed fiber laser

物理学报. 2022, 71(19): 194204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220829>

#### 面向空间引力波探测的激光强度噪声评估系统

Laser intensity noise evaluation system for space-based gravitational wave detection

物理学报. 2022, 71(20): 209501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220841>

#### 国产长锥形光纤实现400 W单频单模激光输出

400-W single-mode single-frequency laser output from homemade tapered fiber

物理学报. 2021, 70(20): 204204 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210682>

#### 基于双路光电反馈下光注入半导体激光器的高性能线性调频信号产生

High-performance linear frequency-modulated signal generation based on optically injected semiconductor laser with dual-loop optoelectronic feedback

物理学报. 2022, 71(21): 214204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221308>

#### 基于光学参量振荡器的可调谐红外激光的强度噪声特性

Intensity noise of tunable infrared laser based on singly resonant optical parametric oscillator

物理学报. 2020, 69(9): 094205 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191952>